

# Explorando a Expansão do Universo com a Equação de Hubble

## Passo 1: Introdução ao Problema

O modelo cosmológico padrão, conhecido como modelo Lambda-Cold Dark Matter ( $\Lambda$ CDM), descreve o Universo como sendo composto por energia escura ( $\Lambda$ ), matéria escura fria (CDM) e matéria bariônica comum. Este modelo tem sido extremamente bem-sucedido em explicar uma vasta gama de observações cosmológicas, desde a Radiação Cósmica de Fundo em Micro-ondas (CMB) até a distribuição em larga escala de galáxias. No cerne da compreensão da dinâmica do Universo em expansão está a equação de Hubble, que relaciona a taxa de expansão do Universo com sua composição de energia e matéria.

## Passo 2: Definição da Equação

A equação de Hubble descreve como a taxa de expansão do Universo,  $H(z)$ , varia com o redshift ( $z$ ). Para um modelo  $\Lambda$ CDM espacialmente plano, a equação é dada por:

$$H(z) = H_0 \sqrt{\Omega_m (1+z)^3 + (1-\Omega_m)}$$

Onde:

- $H_0$  (Constante de Hubble):** Representa a taxa de expansão atual do Universo (no redshift  $z=0$ ). É um dos parâmetros cosmológicos mais fundamentais e sua medição precisa é crucial para a cosmologia.
- $\Omega_m$  (Densidade de matéria):** É o parâmetro de densidade de matéria (bariônica e escura) no Universo hoje, em relação à densidade crítica. Ele descreve a quantidade de matéria que contribui para a desaceleração da expansão.
- $z$  (Redshift):** É uma medida do alongamento do comprimento de onda da luz de objetos distantes devido à expansão do Universo. Um redshift maior indica um objeto mais distante e, portanto, uma época anterior na história do Universo.

## Passo 3: Escolha de Parâmetros

Para explorar a equação de Hubble, utilizaremos valores de parâmetros que são consistentes com as análises cosmológicas robustas, como as obtidas a partir de dados

de Cosmic Chronometers com tratamento completo de covariância. Vamos usar os seguintes valores:

- $H_0 = 62.99 \text{ km/s/Mpc}$
- $\Omega_m = 0.354$
- **z (redshift):** Será uma variável que podemos ajustar para calcular  $H(z)$  em diferentes épocas do Universo.

## Passo 4: Implementação da Equação

Podemos implementar a equação de Hubble em Python para calcular  $H(z)$  para diferentes valores de redshift. Abaixo está um exemplo de código:

```
import numpy as np

def hubble_parameter(H0, Omega_m, z):
    return H0 * np.sqrt(Omega_m * (1+z)**3 + (1-Omega_m))

# Exemplo de uso
H0 = 62.99 # km/s/Mpc
Omega_m = 0.354
z = 0.4783

H_z = hubble_parameter(H0, Omega_m, z)
print(f"H(z) para z={z}: {H_z:.2f} km/s/Mpc")
```

## Passo 5: Interpretação dos Resultados

Ao executar o código acima com  $z = 0.4783$ , obtemos um valor de  $H(z)$  que pode ser comparado com observações reais de  $H(z)$  em redshifts semelhantes. Por exemplo, se o valor calculado for próximo aos dados observacionais de Cosmic Chronometers para esse redshift, isso indica que os parâmetros  $H_0$  e  $\Omega_m$  escolhidos fornecem um bom ajuste aos dados. Discrepâncias significativas entre os valores calculados e observacionais podem sugerir a necessidade de ajustar os parâmetros do modelo ou, em casos mais extremos, indicar que o modelo  $\Lambda$ CDM pode precisar de modificações para descrever o Universo de forma mais precisa.

## Passo 6: Conclusão

A equação de Hubble é uma ferramenta fundamental para entender a expansão do Universo. Ao modelar a taxa de expansão em função do redshift e dos parâmetros cosmológicos, podemos testar a validade do modelo  $\Lambda$ CDM e refinar nossa compreensão

da composição e evolução do cosmos. Embora o modelo  $\Lambda$ CDM seja atualmente o mais bem-sucedido, existem limitações e tensões (como a Tensão de Hubble) que impulsionam a pesquisa futura. A exploração contínua da equação de Hubble, juntamente com novas observações e simulações, nos permitirá aprimorar nossos modelos cosmológicos e desvendar os mistérios remanescentes da expansão do Universo.